[GIL]

基于多物理场耦合的竖井GIL温升特性研究

文/杨 龙 吕 毅 刘鹏飞 朱 凯
西安西电开关电气有限公司

为研究气体、竖井落差高度及风机风量对竖井GIL温升的影响，以550 kV GIL为原型建立了敞开式GIL与竖井GIL用电磁场–温度场–流场多物理场耦合计算模型。通过电磁场获得通流元件的焦耳热损耗，并将其结果耦合到流场中进行温升的仿真计算。敞开式GIL温升试验结果与仿真结果的最大误差不超过1.2 K，验证了采用的多物理场耦合方法的准确性。

气体绝缘金属封闭输电线路（GIL）是一种以绝缘气体作为介质，以金属作为封闭外壳和通流导体的电力输电线路。与架空线和电缆相比，GIL因传输容量大、安全可靠及无电磁干扰等优势，常用于由于地形条件限制的大型核电站、水电站内的竖井和斜井中。GIL在正常运行时产生焦耳热，引起输电线路温度升高，降低绝缘介质的绝缘性能，引发设备热胀冷缩，影响GIL运行的可靠性。与常规敞开式水平布置的GIL相比，竖井GIL更应考虑散热环境、落差高度对温升特性的影响。

本文对敞开式GIL及竖井GIL进行仿真建模，忽略绝缘支撑件对GIL温升的影响，加载频率为50 Hz、电流强度为5 500 A的正弦交流电。基于电磁场-温度场-流场等多物理场耦合的有限元分析方法对GIL的热特性进行仿真研究，计算模型建立了空气及SF_6气体域，考虑了温度对通流元件电导率及气体物性参数的影响，以及重力对气体自然对流的影响。通过耦合的方法将GIL在涡流场得到的损耗作为流场计算的励磁源进行温升仿真。本文将敞开式GIL温升计算结果与试验结果进行对比，验证了所采用模型与方法的准确性。并对竖井GIL进行温升仿真，研究气体、竖井落差高度及风机风量对竖井GIL温升的影响。

多物理场耦合模型

1. 损耗求解理论

导体在交变电场中产生焦耳热和交变的磁场，壳体在交变的磁场中产生感应电流，感应电流在壳体中产生涡流损耗。多物理场耦合模型中损耗的求解分为以下两部分。

电磁场求解由麦克斯韦方程组可得

$$\nabla \times H = J \tag{1}$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \tag{2}$$

$$\nabla \cdot B = 0 \tag{3}$$

式中，H为磁场强度；J为电流面密度；E为电场强度；B为磁通密度。

整个求解域的损耗方程为

$$P = \frac{1}{\sigma(T)} \int_V J \cdot J \mathrm{d}v \tag{4}$$

$$\sigma(T) = \frac{\sigma_{20}}{1 + 0.004(T - 293)} \tag{5}$$

式中，J为电流密度矢量；$\sigma(T)$为温度为T时的电导

率；T为绝对温度；σ_{20}为温度在20 ℃时的电导率。

2. 温度场求解理论

（1）流体物性参数

多物理场耦合模型中涉及的气体物性参数均是关于温度的函数。其中密度、导热系数和运动粘度与温度的关系为

$$\rho = \rho_0 \frac{PC_1}{C_2 T} \tag{6}$$

$$\lambda = \lambda_0 \left(\frac{T}{C_1}\right)^{1.5} \frac{C_1 + C_2}{T + C_2} \tag{7}$$

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{C_1}\right)^{1.5} \frac{C_1 + C_2}{T + C_2} \tag{8}$$

式中，ρ_0、λ_0与μ_0分别为室温条件下空气和SF_6的密度、导热系数与动力粘度；P为气体压强；C_1、C_2为定值，由室温条件下气体的物性参数决定。

（2）传热理论

GIL中产生的热量通过热传导、热对流以及热辐射的形式向周围介质散热，当产热量等于散热量时达到热平衡。

热传导是指相互接触并具有温差的两个物体中或物体由于各部分温度不同，经过分子、原子和自由电子微观运动而引起的换热现象。热传递方向是从高温物体传至低温物体。热传导的基本规律由傅里叶定律可得

$$Q = -kA_c \frac{\partial t}{\partial n} \tag{9}$$

式中，k为导热系数；A_c为与热流方向垂直的面积；$\frac{\partial t}{\partial n}$为沿等温面法线方向的温度梯度；负号表示热量传递的方向与温度梯度的方向相反。

流换热常用牛顿冷却公式表示，即

$$Q = hA_d \Delta t \tag{10}$$

式中，h为对流换热系数；A_d为换热面面积；Δt为流体和壁面的温差。

物体的热能不断以电磁波的形式向外发射，称为辐射散热。辐射散热可表述为

$$Q = \varepsilon C_0 S \left[\left(\frac{T_2}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_1}{100}\right)^4\right] \tag{11}$$

式中，ε为物体的辐射系数；C_0为Stefan-Boltzmann常数；S为辐射物体的表面积；T_1、T_2为冷、热物体的绝对温度。

3. 多场耦合

GIL运行时的总产热量包含通流导体的电阻损耗和壳体产生的涡流损耗。在电磁场中，设置导体和壳体的初始温度为T_{d0}、T_{k0}，根据式（5）计算得到初始电导率，由式（4）求得导体焦耳热损耗和外壳的涡流损耗。将电磁场求得的损耗值通过耦合的方式加载到流场中，作为温度场-流场求解的励磁源，根据传热理论式（9）～式（11）求得GIL的温度分布。提取导体和外壳的温度T_d、T_k与初始温度T_{d0}、T_{k0}并作对比，若满足精度要求，结束计算；若不满足精度要求，则需替换导体和壳体的初始温度，重新进行计算。电磁场-温度场-流场等多物理场耦合的具体过程如图1所示。

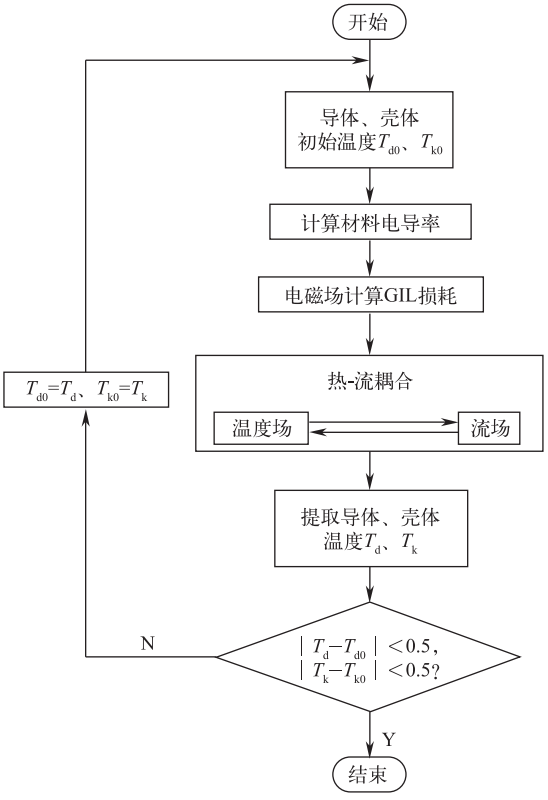


图1　多物理场耦合示意图

敞开式GIL仿真与试验结果对比分析

以实际550 kV GIL为原型，建立长度为1 m的敞开式水平布置的GIL有限元模型，模型包含导体、外壳、腔体内SF_6气体和空气域，导体及外壳材料均为铝合金，模型基本结构如图2所示，腔体内SF_6气体压力为0.4 MPa。

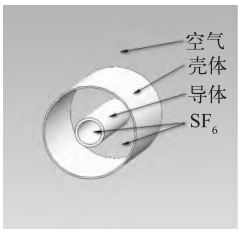


图2　敞开式GIL结构示意图

电磁场中导体加载频率为50 Hz、电流强度为5 500 A的正弦交流电，因为试验采用壳体回流的方式，所以壳体加载频率为50 Hz、电流强度为5 500 A的反向正弦交流电。将电磁场求得的损耗值通过耦合的方式加载到流场中，作为温度场-流场求解的励磁源，环境温度与试验时环境温度保持一致，设置为20 ℃。导体、壳体损耗及温升计算结果见表1，导体和壳体温度云图如图3、图4所示。

表1　敞开式GIL损耗及温升仿真与试验值

名称	损耗/W	温升仿真值/K	温升试验值/K
导体	212	49.0	50.2
外壳	256	25.8	26.2

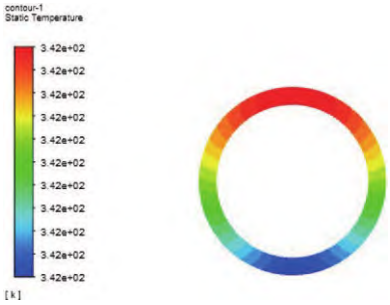


图3　导体温度云图

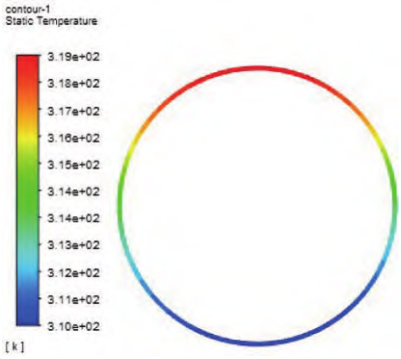


图4　壳体温度云图

从表1可知，温升试验结果与仿真结果最大误差不超过1.2 K，验证了本文采用的多物理场耦合方法的准确性。从图3和图4可以看出，在自然对流和热传导的影响下，水平布置的敞开式GIL导体和壳体上方的温度高于下方的温度，由于壳体处于敞开环境中，这一现象更加明显。

落差高度、风量对竖井GIL温升的影响

1. 落差高度对竖井GIL温升的影响

以实际550 kV GIL为原型，建立了4种不同落差高度的竖井GIL有限元模型，研究落差高度对竖井GIL的影响。竖井GIL水平截面布置示意图如图5所示。竖井两侧对称布置三相GIL， GIL腔体内为0.4 MPa的SF_6，竖井周围为混凝土结构。导体加载频率为50 Hz、电流强度为5 500 A的正弦交流电，环境温度设置为20 ℃，竖井上下出口设为自由出口。不同落差高度竖井GIL温升值见表2。落差高度50 m竖井GIL温度云图如图6所示。

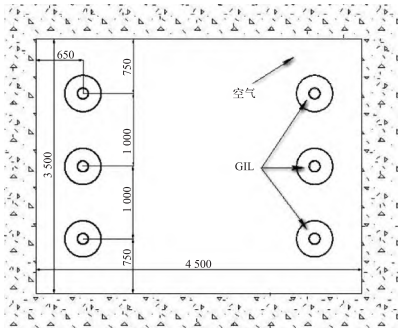
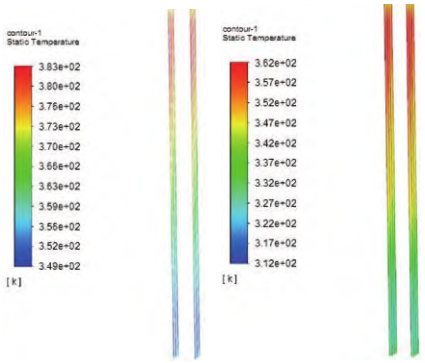


图5　竖井GIL水平截面布置示意图

表2　不同落差高度竖井GIL温升

落差高度/m	导体温升/K	壳体温升/K
20	72.9	52.5
30	77.3	55.9
40	83.1	60.4
50	90.3	68.7



（a）导体温度　　（b）壳体温度

图6　落差高度50 m竖井GIL温度云图

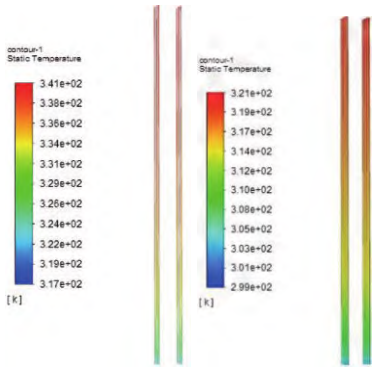
由表1和表2可知，随着落差高度的增加，竖井GIL导体和壳体的温升均增大。由于竖井GIL比敞开式GIL散热环境差，同样电流强度的励磁下，竖井GIL温升明显高于敞开式GIL温升。由图6可知，由于对流换热和热传导的影响，竖井GIL导体和壳体上方的温升明显高于下方。

2. 风量对竖井GIL温升的影响

以实际550 kV GIL为原型，将落差高度50 m竖井GIL作为对象，研究风量对竖井GIL温升的影响。导体加载频率为50 Hz、电流强度为5 500 A的正弦交流电，环境温度设置为20 ℃，竖井上方出口设为压力自由出口，竖井下方入口设为风速入口。不同风量值与竖井GIL温升见表3。风量43.50 m^3/s、落差高度50 m竖井GIL温度云图如图7所示。

表3 不同风量下竖井GIL温升

风量/(m^3/s)	导体温升/K	壳体温升/K
0	90.3	68.7
7.25	84.1	64.3
14.50	79.2	60.2
21.75	61.5	42.5
29.00	56.1	37.7
36.25	51.7	31.8
43.50	47.6	27.4



（a）导体温度　　（b）壳体温度

图7 风量43.50 m^3/s，落差高度50 m竖井GIL温度云图

由表3可知，风量值越大竖井GIL温升值越低，提升竖井内风量值能有效地降低竖井GIL温升。 由表1和表3可知，在550 kV GIL为原型的竖井GIL中，风量值为43.50 m^3/s时，竖井GIL温升值与敞开式GIL导体温升值相差－2.6 K，与壳体温升值相差1.2 K。因此在工程运行中，竖井内风机风量值至少为43.50 m^3/s时，才能满足竖井GIL温升值与敞开式GIL温升值基本一致的要求。

结束语

本文以实际550 kV GIL为原型建立了敞开式GIL与竖井GIL多物理场耦合计算模型，研究了气体、竖井落差高度、风机风量对竖井GIL温升的影响。

1）敞开式GIL温升试验结果与仿真结果的最大误差不超过1.2 K，验证了多物理场耦合方法的准确性。

2）由于热传导及气体对流的影响，敞开式GIL及竖井GIL导体和壳体上方的温升明显高于下方。在产品运行时，对GIL优先监测上方的导体及壳体温升。

3）竖井GIL比敞开式GIL散热环境差，且随落差高度的增加，竖井GIL导体和壳体的温升均增大。

4）提升竖井内风机的风量值能有效地降低竖井GIL温升。EA

（收稿日期：2023-03-21）

参考文献

[1] 周利军，张讥培，王朋成，等．环境因素影响下GIL温升特性的仿真计算分析[J]．电力自动化设备，2019，39(1)：211-218．

[2] 黎斌．SF_6高压电器设计[M]．5版．北京：机械工业出版社，2006．

[3] 高璐，贾云飞，汲胜昌，等．环保型1 100 kV GIL 用三支柱绝缘子多物理场耦合仿真及校核[J]．高电压技术，2020，46(3)：987-995．

[4] 徐亮，张高爽，龙艳，等．特高压管廊GIL热特性的数值模拟[J]．哈尔滨工业大学学报，2018，50(7)：177-184．

[5] 刘朋飞，南振乐，李振军．高落差竖井GIL机械强度分析及验证[J]．电气时代，2021(1)：32-34．

[6] 卞超，关为民，王国良，等．特高压GIL 管廊竖井中SF6泄漏特性的数值模拟研究[J]．高压电器，2021，57(1)：33-40．

[7] 丁慧心，肖益民，周铁成．地下水电站出线竖井中SF_6泄露扩散的数值模拟分析[J]．制冷与空调，2016，30(6)：623-628．

[8] 纽春萍，矫璐璐，王小华，等．基于多场耦合的环保型GIS热特性分析[J]．电工技术学报，2020，35(17)：3365-3371．